极低频射电天文观测现状与未来发展

梅丽[1, 2, 3]，苏彦[1, 2, 3]，周建锋[4, 5]

(1. 中国科学院大学，北京 100049； 2.中国科学院国家天文台，北京100012；3. 中国科学院月球与深空探测重点实验室，北京 100012；4. 清华大学工程物理系天体物理中心，北京 100084；5. 粒子技术与辐射成像教育部重点实验室（清华大学），北京 100084)

摘要： 极低频()是现代天文观测一个十分重要的频段，通过极低频探测可以开展太阳爆发、恒星形成、星系演化、宇宙早期状态等重要研究。但是对于频率低于10~20MHz的信号而言，由于地球电离层的反射或严重失真影响，以及地球上存在着低频无线电干扰源无法对该频率范围内的信号进行探测研究。月亮背面是开展低频射电观测的一个独特的平台，相比于地球来说是一个得天独厚的理想环境。对具有代表性的极低频射电望远镜进行了调研，就极低频天文观测的科学意义、发展现状和相关技术做一个回顾性总结。在可预见的未来几年，我国嫦娥4号搭载的极低频射电频谱仪将是世界上最重要的低频观测设备之一，本文也对该设备进行了初步介绍。

关键词： 射电天文； 极低频；国内外现状； 嫦娥4 号

中图分类号：161 文献标识码：A 文章编号：1672-7673（2018）

1930年美国无线电工程师卡尔.央斯基[1]发现了银河系的无线电辐射，从那时起，在传统的光学、红外窗口基础上，天文观测又增加了一个非常重要的可探测波段—射电窗口得益于射电波段大气透明的特性，射电天文发展迅速，先后取得了发现脉冲星，测量宇宙微波背景辐射等十分引人瞩目的成就，因此射电天文也被称为天文学的第二次重大变革。

射电天文观测最主要的两项参数是灵敏度与分辨率，灵敏度决定了望远镜能够探测的最小流量密度，灵敏度越高，能够探测到的暗弱源越多。分辨率其实质是角分辨率，分辨率越高越鉴别两个靠近的射电源的能力越强。对于低频信号的观测，借助干涉测量技术的发展应用，正逐步实现较高分辨率观测射电源目标。灵敏度通常可以通过加大天线尺寸，延长观测时间，降低望远镜系统噪声等方式提高，但是地球电离层的吸收、折射、反射及闪烁效应引起的低频信号强度弱化和严重变形[2]，地面无线电的干扰等不可抗因素，使得极低频观测很难达到设计的灵敏度。正因如此，射电天文观测主要集中在30MHz到100GHz,对在30MHz以下的探测则处于相对较少的阶段。然而极低频观测能为进一步理解宇宙，星系，恒星的相关物理现象提供新的数据，并具有发现全新的天文现象的可能性。

本文将梳理极低频射电探测所涉及的科学目标；并列出20世纪60年代以来观测频率在40MHz以下的射电望远镜，介绍它们的基本信息和主要性能参数；简单论述在极低频射电观测中使用的主要技术和面临的挑战；嫦娥4号（CE-4）作为我国开展极低频观测的尝试，将于2018年发射，本文介绍上面搭载的用于极低频射电探测的相关仪器；最后回顾极低频射电观测的发展历史，同时展望其未来的发展。

1 极低频射电观测的科学意义

宇宙黑暗时代（Dark Age）包含了宇宙早期物质分布的初始状态特征，宇宙的再电离时代则反映了宇宙早期中性氢到电离氢的演化过程。对于这两个时期的探测是理解宇宙演化，检验宇宙模型的重要部分[3]。在宇宙黑暗时代，宇宙中还没有产生恒星，宇宙里的气体温度较低，无法出现光学波段的辐射，因此也就无法通过光学观测得到这一时期的信息 宇宙第1代恒星和由其构成的第1代星系产生后，其辐射能量将其周围的中性氢电离，形成电离泡，而后电离泡中再孕育新的恒星，并依此循环膨胀拓展到整个宇宙，这期间星系之间的中性氢变为电离氢的转变[4]就是宇宙的再电离时代。这一时期包含了第一代恒星，星系形成的信息。目前对于这两个时期的探测是通过观测大家熟知的中性氢21厘米线。中性氢21厘米线是中性氢的电子在其自旋能级分别取正负1/2的能级上跃迁产生的发射线或

基金项目：国家自然科学基金（11373025）资助.

收稿日期：2017-08-22；修订日期：2017-10-11

作者简介： 梅丽 Email: meili@nao.cas.cn

吸收线[5-6]。其需要的能量非常低，且在传播的过程中被吸收的几率也很低。在宇宙黑暗时代和再电离时代产生的21厘米线可在今天被观测到，由于宇宙膨胀-宇宙红移，观测到来自这两个时期的氢线波长会被拉长，相应的频率也会降低，宇宙早期对应的红移值在高红移端（z=11.4到z=20或更高），其对应于频率在115MHz到70MHz或更低的极低频频端[7]。极低频射电观测，对于宇宙学的研究有不可替代的作用。

相对论电子在磁场中运动产生同步辐射，同步辐射是产生低频射电辐射的重要机制。理论模型可以给出同步辐射过程中星际磁场、相对论电子的能量和观测到的频谱之间的依赖关系[8]。低频射电辐射主要是来自银河系中的高能电子的辐射[9]。通过低频射电的观测，获得相对论电子和磁场的分布信息，了解宇宙线的产生和传播机制以及银河系的结构。电离氢区域的电子数目和动能温度是这一区域的重点探测目标，在低频射电波段上，电离氢区域主要表现在吸收上，对低频吸收线的观测是对电离氢区域特征研究的重要手段。

太阳射电爆的观测是太阳射电研究的重要部分，太阳射电暴根据频谱特征，可分为5种大的类型，I型射电暴具有爆发时间短的特点；II型射电暴频带较窄，且其频率随时间快速下降；III型射电暴相对II型射电暴频带更窄，下降速率更高；IV型射电暴伴随着III型射电暴，下降趋势一致，但频谱会相对展开；V型射电暴对应于连续谱，且频带十分宽[10]。其中II、III、IV、V型射电暴都有对应于米波段的射电辐射。目前理论认为，米波段即极低频的射电辐射源自太阳爆发过程中的能量释放和转化的最为关键的一个区域（日心距离在1.2-2.5太阳半径之间，对应频率几十兆赫兹-几百兆赫兹），也是太阳高能粒子产生的重要区域[11]。因此极低频射电数据携带着太阳爆发运动过程和粒子加速与辐射的丰富信息，极低频射电窗口是太阳和空间物理研究非常有用的窗口。WIND/WAVES和STEREO/WAVES的重点探测目标便是太阳和空间中的极低频射电辐射源。极低频射电观测对于太阳的研究还可拓展到以下几个方面：日冕磁场的物理机制和演化特征；耀斑的物理机制、空间天气、平静时期的太阳物理特性、日珥探测等几方面。极低频射电观测将加深对太阳日常活动的物理机制的认识。

1955年，Bernard Burke和Kenneth Franklin偶然发现了木星的射电爆发现象[12]，到目前为止，低频射电探测已经成为行星研究的普遍手段。木星的射电爆发主要集中在米波到百米波区域[13]，对应频率在几十兆赫兹，因此对木星的极低频观测将有助于了解木星的间歇性射电辐射机制和磁层特征[14]。在系外行星研究邻域，出现了如磁能模型、动能模型、日冕物质抛射（CME）模型等行星射电辐射理论模型，这些模型理论上给出了具有极低频射电辐射的系外行星候选体[15]，对这些候选体进行极低频观测将是检验这些理论模型的有力手段。

除上述之外，目前已知很多天体均会产生低频射电辐射，如超新星遗迹、类星体、星系介质、星系等。因此利用低频射电观测可以研究天文学的重大问题，拓宽人类对天空的认识边界。

2 极低频射电天文观测现状

2.1 地基极低频射电望远镜

极低频射电观测的起步并不晚，最开始央斯基进行射电观测所选择的频率就是18MHz[16]。二战结束后，研究无线电的科学家将用于军事监测的雷达系统进行改造，将一大批雷达变更为用于射电天文观测的望远镜。英国、法国、澳大利亚等国家成为早期低频射电观测的主要地区。这一时期地基极低频射电望远镜进入蓬勃发展的阶段[17]。无疑在地面建造望远镜进行观测是最为经济的方式，但是由于地球的电离层——天然的高通滤波器的存在，使得到达地球的米波（10MHz～40MHz）信号严重失真。其次电离层的截断频率(通常为10MHz)依赖于电离层的特性[18]，越低的大气电离度，电磁波越容易到达地球。因此要想在地基极低频射电望远镜上获得有效数据必须考虑电离层的分布特点，望远镜的选址成为影响极低频射电观测最重要的因素[19]。电离层在偏离地磁场磁极一定距离的中纬度地区，其电离度达到最低，即电离层空洞的地区，也就是现在为人们熟知的电离层槽[20]，这些地区就是较为理想的极低频射电观测位置，如图1给出中纬度的电离层槽图。澳大利亚的塔斯马尼亚岛就位于电离层电离槽对应的区域，澳大利亚利用这一地理优势在20世纪

70 年代开展了射电极低频阵的天文观测[21]。塔斯马尼亚阵（Llanhern low-frequency array,简称 Llanhern）对南天分别在 3.7、5.6、8.3、13.0、16.5MHz 进行巡天观测，如图 2、3 给出了南天部分区域的射电等高图[22]，这些数据也是到目前为止在地面进行的极低频射电观测获得的最为完整和有效的科学数据。除此之外，澳大利亚从 1958 年开始先后基于 Shan cross 和 Mills cross 构型建设了一系列的极低频射电阵[23-24]。其中基于米尔斯十字架构型的悉尼 19.7MHz 射电望远镜（The Sydney 19.7mc "Mills Cross" radio telescope，Sydney），在 1961 年进行了高分辨率巡天，其分辨率达到[2，25]，其结果与塔萨马尼亚测得的结果一致。早期在低频观测覆盖 0~30MHz 的望远镜有 Hornsby Valley Field Station（以下简称 HVFS），Fleurs Field Station（以下简称 FFS）。HVFS 利用被动雷达探测方式，对月球进行了表面地形成图，发现月球表面是凹凸不平的地形，而 FFS 重点观测对象为木星，在检测木星低频射电暴发中，得出由于木星大气层中的电力区域聚集着活跃的等离子体，等离子相互碰撞产生低频射电暴发。表 1 列出在 20 世纪 60、70 年代一些地基低频射电观测望远镜的基本信息及工作参数。

表 1 地基早期极低频射电望远镜

Table 1EarlyEarth-Ground very low frequency radio telescope

	Llanhern[26]	Sydney [24]	HVFS [23]	FFS [25]
时间	1954	1961	1946	1952
地点	Tasmania	Sydney	Hornsby Valley	Fleurs
工作频率	2~20MHz	19.7MHz	<30MHz	2~32MHz
分辨率				
望远镜阵型	东西分布	十字形	十字形	十字形

早期低频阵的分辨率相对较低，不能对单个射电源进行有效的观测，只能对南天的一部分区域进行巡天观测。即便是巡天，在早期设备简陋、数据处理方法简单的情况下，得到的观测数据十分粗糙，精度不高。此外观测条件也极为苛刻，必须在太阳的宁静期，且要选择冬季的夜间进行观测，还要时刻注意其它基站的干扰等。但澳大利亚早期的极低频射电观测依然十分重要，这些观测给出了第 1 幅银河系极低频射电等高图，为后来的极低频射电天文发展奠定了基础。

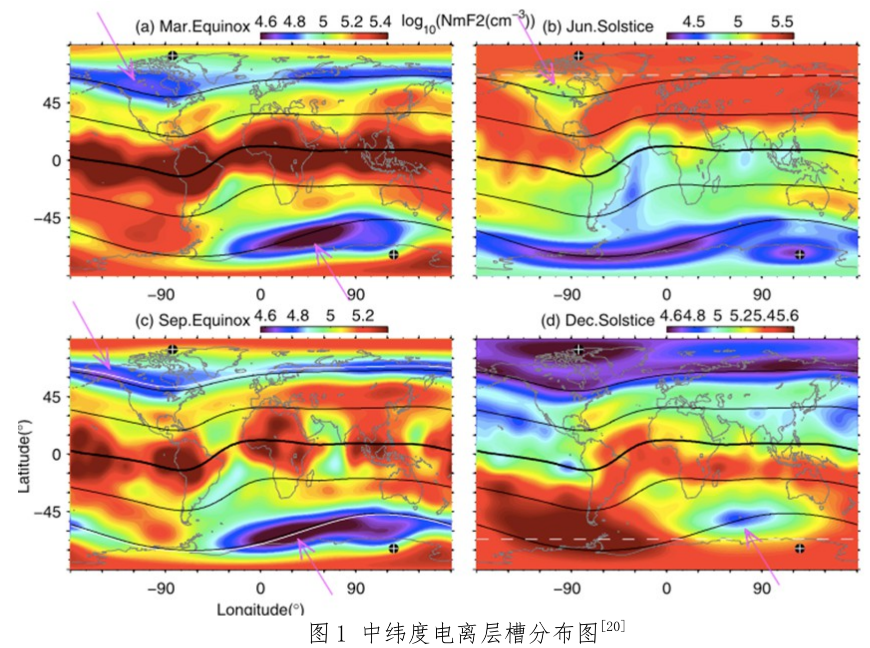


图 1 中纬度电离层槽分布图[20]

Fig.1 Mid - latitude ionospheric “trough” distribution

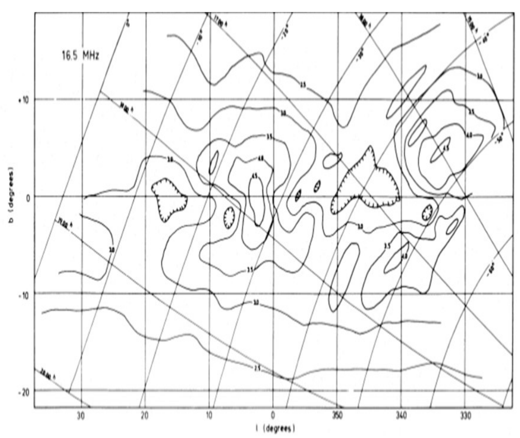


图 2 银河系南天部分区域 16.5MHz 等高图[22]
figure.2 Contours of brightness temperature at 16.5MHz[22]

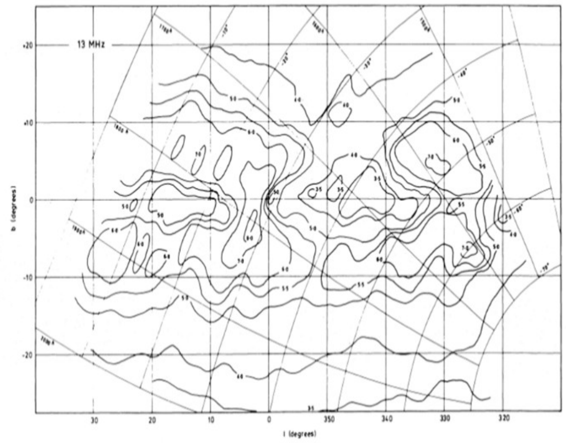


图 3 银河系南天部分区域 13MHz 等高图[22]
figure.2 Contours of brightness temperature at 13MHz[22]

后期的地面低频射电望远镜如乌克兰的 UTR-2, 法国的 NenuFAR, 澳大利亚的 The Bruny Island Radio Spectrometer（BIRS）、Culgoora 的射电光谱仪[27-28], 印度的 GEETEE[29], 美国的 Clark lake Teepee-tee 等都可进行高分辨率的射电观测。在 20 世纪 90 年代, 这些射电望远镜都取得了良好的观测成果, 澳大利亚的 BIRS、Culgoora 集中观测了 1992 年的太阳 II、III 型射电暴群, GEETEE 给出了第一幅外日冕层非连续缓慢变化的射电源二维图像；探测到天体低频碳复合线。其中 UTR-2 作为最大的米波级望远镜之一, 其角分辨率可达到 30’, 获得太阳射电暴三维结构变化图，首次实现了 SED 地面观测等。后与乌克兰的其它 4 个工作频率与 UTR-2 一样的小射电望远镜共同组成了 URAN(Ukrainian Radio Interferometer of NASU)。基线长度最长可达到 900km, 分辨率也得到大幅提升。目前 UTR-2 将升级为 GURT, 工作频率上限也增加至 80MHz, 其探测目标涵盖地球磁层、月球环境、太阳射电、星系、类星体等[30]。相关参数与观测成果如表 2。

表 2 地基极低频射电望远镜

Table 2Earth-Ground very low frequency radio telescope

	BIRS[27]	Culgoora[28]	GEETEE[29]	UTR-2[30]
时间	1994	1992	1976、1985	1972
地点	Bruny Island	Culgoora	Gauribidanur	Ukraine
工作频率	3～37MHz	18~37MHz	30~70MHz	8~33MHz
望远镜阵型	塔形		T 形	T 形

随着技术的发展，计算机的数据处理能力提升，数据存储阈值不断扩大，建设大型射电阵成为可实现的目标。对于极低频射电天文望远镜，欧洲的 LOFAR 和美国的 LWA 是现今世界上低频最前沿的观测设备。LOFAR 分为两个工作频段，其中低频的接收频率为 30 到 80MHz, 与 LWA 的工作频段一致[31]。探测目标涉及宇宙早期形态、宇宙射线、脉冲星、太阳射电、行星物理等。阵列规模巨大，都采用偶极子天线等。LOFAR 位于北欧经度为 55º 更有利于观测河外星系，LWA 则是、位于经度为、34º，可观测银河系中心区域[32]。

表 3 地基极低频射电望远镜

Table 3Earth-Ground very low frequency radio array

		LOFAR[31]
	LWA[32]	

地点

荷兰，法国，瑞士，德国，英国

美国新墨西哥州

工作频率

30~240MHz

10~88MHz

时间

2006～2012

2010

天顶灵敏度

20mJy

0.4mJy

分辨率

亚角秒

角秒（2″）

望远镜阵型

规则

不规则

科学目标

21cm 线探测；

河外星系研究；

射电暴和脉冲星；

甚高能宇宙射线；

太阳物理和空间天气。

宇宙演化；

超新星遗迹；

星际介质宇宙线；

太阳物理和空间天气；

相对论粒子的加速过程研究。

地基低频射电观测十分困难，除了选择优良的台站位置以外，还需在硬件设备、数据处理方法、软件上做许多工作，提高抗干扰能力、分辨率、灵敏度等。对于地面的米波级观测，最初使用扫频分析仪（SFA）、声光谱仪（AOS）、滤波器组（FB）、数字相关器（DAC）都无法在灵敏度、时间分辨率、动态范围和仪器尺寸上做到兼顾，后来法国Paris-Meudon 天文台和澳大利亚空间研究所的科学家研制出数字光谱仪可以实时得到高质量的天体信号[33]。现今以 LOFAR 为首的大型阵列，又面临着海量数据存储，快速高效的数据处理等挑战。地面低频射电望远镜仍旧是低频射电观测不可或缺的部分。

2.2 空间极低频射电卫星

前文提到由于地球电离层的影响和人为的无线电干扰，在地面上进行理想的极低频射电观测十分困难。而空间探测有效降低地球电离层和人为干扰的影响，最早做出极低频射电空间探测尝试的是美国哈佛大学、密西根大学、加拿大 DRTE，以及英国剑桥大学的相关团队[34]。他们结合太阳、木星的射电爆发，宇宙微波背景辐射，以及电离层 f 层的电子密度分布等课题，指出开展空间极低频射电卫星探测的可行性和必要性[35]。而后，在开展空间极

低频观测中，将探测器送入预定轨道进行长时间探测是主要形式，此外，也有将接收设备搭载于火箭上进行特定频率范围的短时间观测模式。如法国在 1967 年利用第 2 种模式在 1.16MHz 和 2.4MHz 两个频点在 1600km 高度进行了短时间的宇宙射电信号观测等[36]。表 4 列出了 20 世纪 60 年代以来部分空间极低频射电望远镜的基本信息。

表 4 空间极低频射电探测器

Table 4Space very low frequency radio detectors

	RAE-1[37]	RAE-2[37]	WIND/WAVES[3	STEREO/SWAV

			8]	ES[39]
时间	1968	1975	1994	2006
轨道	绕地轨道	绕月轨道	绕地轨道	地球公转轨道的前后两端
主导国家	美国	美国	美国	美国
工作频率	20KHz~13.1MHz	20KHz~13.1MHz	RAD1:20KHz~1.04MHz RAD2:1.75~13.825MHz	HFR:40KHZ~16MHz LFR:10~40KHz FFR:50MHz
重大进展	地球磁层是一个极光辐射的强源	太阳 II、III 型射电暴发的探测，实现联合观测等		

续表：

	PRA on voyager[40]	ISEE[41-42]	CASSINI[43]	IMP-6[44]
时间	1977	1978	1997	1971
轨道		绕地轨道	绕土（星）轨道	绕地轨道
主导国家	美国	美国，欧洲	美国	美国
工作频率	1KHz~40MHz	10~30MHz	1Hz~16MHz	20Hz~200KHz
重大进展	近距离探测木星、土星、金星等的极低频辐射	三维示踪太阳 III 型射电暴	土星的等离子体波，大气尘埃，低频射电辐射探测	极低频波在磁层中的传播特性研究

RAE 系列射电探测器开创了空间极低频射电探测的先河。虽然由于技术的不足和来自地球的无线电干扰以及探测器本身的天线间干扰，使得这一系列探测器并没有取得有效的科学数据，但是，作为实验性探索为后来的空间极低频探测提供了经验。而 WIND/WAVES 和 STEREO/SWAVES 除了实现单点观测以外，还可以相互合作实现多点观测。图 4 是在 2007 年 12 月 7 号对太阳射电暴的观测[45]。

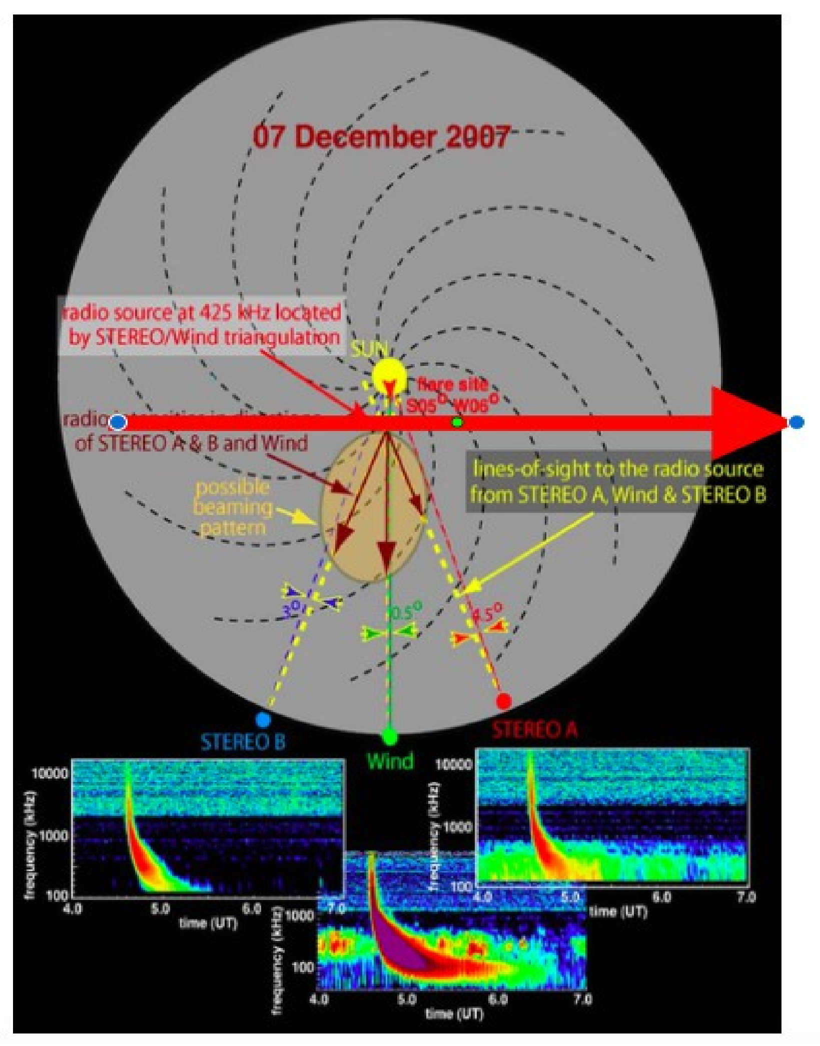


图 4 WIND/WAVES 和 STEREO/SWAVES 对太阳的多点联合观测[40]

Fig.4 WIND / WAVES and STEREO / SWAVES multi-point joint observation of the sun
WIND/WAVES 和 STEREO/SWAVES（A,B）同时观测到频率在的 III 型射电暴信号

空间极低频射电望远镜的未来发展集中在利用综合孔径技术获取高分辨率图像。例如美国提出的 Astronomical Low Frequency Array(ALFA)计划，将发射 16 颗带有偶极子天线的卫星，在环绕地球的逆行轨道上组成有效口径达到 100Km 的极低频阵，工作频率在 0.03MHz 到 30MHz 之间[46]。

2.3 月基极低频探测计划

月球背面是太阳系中非常适合探测射电辐射的地方，相对于地球，月球背面始终背对地球，可以吸收来自地球的噪声，是一个天然的滤波器，同时，月球的电离层相对来讲更薄、更少，拥有更低的电离层截断频率。而相对轨道器而言，探测器坐落在月球上，有一个更稳定的平台。因此可得到更加精确的相对位置和相位连贯性。月球自转提供扫描天空的周期，其无风无水的自然环境也使得维修的成本减少。在月球上修建望远镜进行低频射电观测的构想产生于 20 世纪 60 年代。1964 年，Gorgolewski 提出在月球与其轨道上构建综合孔径阵，以实现在月夜进行高分辨率的射电探测，在月日进行对太阳的探测[47]。1985 年 Burns 提出长基线的月球地球干涉测量[48]。到 1990 年代，掀起了一股在月球上建设极低频射电望远镜的热潮，Douglas 和 Smith 提出建立 15*15Km 平方阵[49]，NASA 成立在月球背面实现低频射电

探测的项目工作组，计划 2002 年到 2018 年完成所有建设的 Lunar far-side low frequency array[50]等。

第 1 个真正意义上进入设计阶段的月基低频射电阵列 1992 年美国休斯航空公司提出的天文月基低频阵（Astronomical Lunar Low Frequency Array, ALLFA）。ALLFA 计划耗时 8 年在 2000 年发射，着陆点选在恰普雷斯环形山，工作频率为 0.1MHz 到 30MHz, 选取 40 个长为 0.3m 的交叉偶极子天线作为接收信号天线，构成椭圆形的阵列形状。天线由月球车按照预先选定的位置摆放，着陆器位于阵列中心，同时在地月的拉格朗日 2 点发射中继星用

于通讯和数据传输。灵敏度可达到10Jy,设计寿命12年[51]。

1993年，国际空间大学（ISU）提出了国际月球背面天文台和科学站计划（International Lunar Far-side Observatory and Science Station，ILFOSS）。预选着陆点为奥尔科夫斯基陨石坑，工作频点为1，3，10，30MHz，天线形式为单偶极子天线，长1m,一期工程为5个台站，二期工程扩大为300个，阵列形状为圆形，灵敏度-13dB，设计寿命10年。

1997年欧空局提出的月球背面甚低频阵（Very Low Frequency Array on the Lunar Far Side，VLFA）。着陆点与ILFOSS一样，都为奥尔科夫斯基陨石坑，其科学目标为低频巡天，太阳低频物理研究，搜寻系外射电源。由300个长4m的交叉偶极子天线组成Y型阵列，接收频率为0.5到16MHz范围内的信号。

如今还有由欧空局主导的月基射电天线（Lunar Radio eXpriment,LRX），美国航空航天局资助的暗时代月球干涉仪（Dark Age Lunar Interferometer, DALI），射电宇宙学阵列望远镜（Lunar Array for Radio Cosmology, LARC）等都是重要的探测极低频射电的项目[52]。

2015年1月欧空局提出在月球背面着陆的FARSIDE计划[53]，计划于2020年向月球背面发射着陆器，并通过位于点的中继星进行通信。FARSIDE计划搭载用于射电天文观测的极低频射电干涉仪，其中着陆器和中继星各搭载一个射电频谱仪，两者进行干涉测量。着陆器极低频射电频谱仪的工作频率为16KHz~40MHz，使用2~3个长度大于5m的单极天线；中继星搭载的射电频谱仪工作频率为1~40MHz，3个接收天线的长度为2~ 2.5m。中国将于2018年发射嫦娥4号，嫦娥4号也将搭载极低频频谱仪，用于科学探测，获取有效的科学数据。表5列出了FARSIDE和嫦娥4号的基本科学目标。

表5 月基极低频探测项目

Table 5 Very low frequency radio astronomy observatory on the Moon

	FARSIDE[53]	CE-4
时间	2020	2018
科学目标	宇宙学 全天射电成图 行星磁层 脉冲星研究	太阳低频电场 月球空间环境 行星低频射电爆发 银河系低频特征辐射
主导方	ESA	中国

3 低频射电观测采用的基本方法

3.1 干涉测量技术

极低频射电天文观测一般采用干涉测量技术提高分辨率,消除随机误差。干涉测量技术的原理如图5，从遥远射电源传播而来的电磁波到达位于相距为b的两个天线，由于几何距离不同存在一个延迟。通过延迟的电位相关函数（可见度函数）可以求得各个方向上的天空亮度。在二维观测情况下，设u、v、w为基线b所处坐标的互相垂直的3个分量，其中w指向辐射源方向。可见度函数可表示为

其中,、是距离射电源中心一个小量的坐标值；表示通过观测得到的,平面的可见度函数；是方向处源的亮度。将可见度函数进行傅里叶逆变换可得到射电源图像：

在空间进行干涉测量时，需要将数据存储下传至地面中心进行后期处理。干涉测量仪一般配备相关接收机，输出正比于两个天线输出电压乘积的平均值。因此，如果某种噪声或干扰只影响其中的一个天线，则相关输出将为0。这就使得相关接收机可以抑制接收机噪声以及外来的只对一个天线有作用的有害干扰。相比单天线观测，干涉测量的抗干扰能力更强。

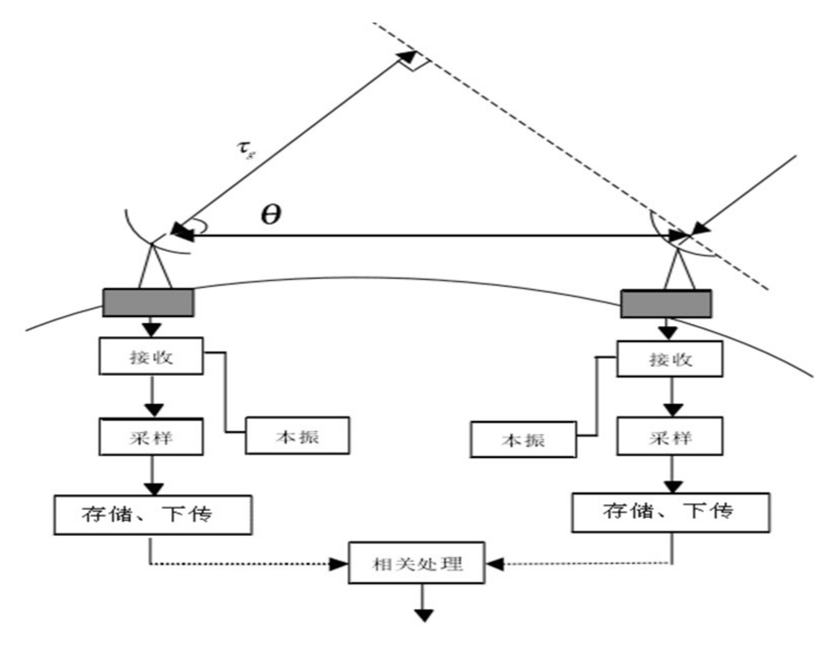


图 5 干涉测量示意图
Fig. 5 Schematic diagram of interference measurement

3.2 天线

极低频射电观测一般采用偶极子天线，结构简单,易于设计,并可随意更改阵列结构以达到理想的极化需求[54]。偶极子天线在增益方向图性能方面较单极子天线有一定的提高，且能获得较为满意的方向图特性。对于线性偶极子的辐射功率：

其中，、分别表示天线长度和波长；I_0为天线电流。功率与天线长度的平方成正比关系，因此要想得到比较高的辐射功率，就需要将天线做到较长，尤其对于极低频而言，波长较长，对应需要的天线长度更长，这就是早期 RAE 系列，天线为什么做到 229m 的原因[38]。但是天线过长在空间探测中，需要的技术难度（如天线展开，天线相互影响等）更高，重量提升也带来成本的提高。在地面架设很长的天线相对比较容易，且造价低廉，还可通过建设阵列提高方向性，早期的澳大利亚的低频阵多是采用长天线线性偶极子阵。后来随着天线设计技术的提升，也为了降低重量和天线间的互相干涉，不再采用过长的天线，而采用可折叠展开技术的相对较短的天线。

4 嫦娥 4 号极低频射电探测载荷

我国开展低频射电观测相对较晚，在 20 世纪 90 年代提出的空间太阳望远镜（SST）项目，科学家提出了在其上搭载极低频(VLF)射电频谱仪的构想，并研制了原理样机[55]。从科学家提出在空间望远镜上搭载低频射电频谱仪进行太阳和行星的相关测量开始到如今，经过 30 年的努力，嫦娥 4 号将完成我国对极低频射电空间观测的突破。

嫦娥 4 号分为着陆器和中继星，计划于 2018 年发射，嫦娥 4 号将搭载 4 个极低频射电观测设备，包括着陆器搭载的极低频射电频谱仪,中继星上搭载的一个极低频射电频谱仪，两个月球轨道超长波天文观测微卫星。主要科学目标为观测太阳低频信号和月球的空间环境。

4.1 着陆器低频射电频谱仪

嫦娥 4 号着陆器极低频射电频谱仪由中国科学院电子研究所主导设计研发，采用三分量（Tripole）有源天线[56]，由 3 个相互正交长度为 5m 电偶极子天线组成，以实现电磁波信号的接收。3 个天线安装于着陆器顶部，其中一个天线垂直于着陆器顶面，另两个天线则平行于着陆器顶面。着陆器极低频射电频谱仪分为两个工作带宽，第 1 个频段为低频 0.1MHz 到 2MHz,频谱分辨率为 5KHz,第 3 个频段为 1MHz 到 40MHz,其对应的频率分辨率

为 100KHz。动态范围在 75dB 以上。着陆器平台电子设备如数传调制器和电源控制器等产生强度比较高的低频噪声电场，形成对低频射电频谱仪干扰信号，甚至淹没太阳爆发的辐射信号。为此，专门增加了 20cm 的短天线进行干扰信号抑制。短天线的长度短，距离着陆器近，接收到的信号主要是着陆器噪声信号，利用短天线收到的噪声消除长天线收到的干扰信号。

4.2 荷兰-中国低频探测器

荷兰-中国低频探测器（The Netherlands-China Low-Frequency Explorer - NCLE）是由 ASTRON、Redbound University、ISIS、中科院国家天文台(NAOC)合作研制的低频科学接收器。NCLE 将搭载在嫦娥 4 号中继星上，中继星位于地月的拉格朗日 2 点，其轨道高度达到 6.4

千米。主要探测目标包括高红移的 21cm 线，宇宙黑暗时代信号，测量太阳系行星的极光辐射，测定地月的拉格朗日 2 点的射电背景强度，研究地球电离层等。NCLE 设计为 3 根长为 5m 的单极天线，共位地安装在中继星的外墙上。为了减少共模干扰，采用偶极天线，科学信号频率范围为 1~80MHz 时，灵敏度最佳。也可探测频率在 KHz 级的信号，但灵敏度会相应降低。由软件控制的多种科学模式可以执行快速傅里叶变换转换为创建平均无线电频谱，允许触发短暂的无线电事件，或允许检索到达的方向信息等。

4.3 月球轨道超长波天文观测微卫星

月球轨道超长波天文观测微卫星由哈尔滨工业大学主导，两颗微卫星组成绕月编队超长波干涉仪，主要通过对 1MHz 到 30MHz 的射电信号的观测，获取超长波全天空图像以及全天射电频谱测量，同时检测太阳和系内行星的超长波射电活动。天线形式为三正交偶极子天线，长度为 1m，在中心频率 15MHz 处空间分辨率可达到 2deg，频谱分辨率初步设计为 1000KHz。月球轨道超长波天文观测微卫星由嫦娥 4 号中继星火箭运载进入绕月轨道，两颗微卫星可实现的干涉基线长度范围为 1Km 到 10Km。

嫦娥 4 号着陆器位于月球背面，可避免人为的无线电干扰，电离层的影响相对地球较为

微弱，是一个理想的低频射电观测平台，可有效探测低频射电源。但是银河系背景噪声、仪器自身噪声等都是很强的干扰源。为提高抗干扰能力，得到精细的射电图像，在未来可以考虑采用干涉测量技术，将嫦娥 4 号着陆器极低频射电频谱仪与 NCLE，以及两颗轨道微卫星组成长基线空间干涉阵，进行干涉测量。

实现着陆器和中继星的干涉测量，微卫星的干涉观测，中继星、微卫星的定位及准确测量中继星与着陆器之间、微卫星与微卫星之间的距离是技术难点之一。距离测量与干涉测量的后期成图质量息息相关[57]，基线测量误差如果超过一个波长，将使得测量难以进行，目前可行的解决方式是用微波测距尽量提高精度。其技术难点之二是数据的存储与传输。虽然是在低频，但即使经过数据预处理后，数据量还是相对比较大。要在有限的带宽内完成数据传输工作，也是一个必须考虑的技术难点。

5 总结

极低频射电天文的发展与技术进步紧密相连。最初的地面低频射电阵，因地球电离层的截断，导致只能在如澳大利亚、英国等一些地点实现观测。随着空间技术的蓬勃发展，空间极低频射电卫星获得了 10MHz 以下的射电信号。再到月基低频探测计划，利用月球得天独厚的条件，可获取更多的微弱极低频射电源信号。

地基极低频射电观测依然是很重要的一部分。为了实现在地球电离层截断频率以上的高分辨率观测，可通过扩大干涉阵的规模，寻求多国合作等方式，欧洲的 LOFAR 即是如此。地基极低频射电阵的发展，必将面临数据存储、数据处理等各种挑战，在科学研究逐渐深入的前提下，对天线设计、数据接收、灵敏度、分辨率等也提出更高的要求。

空间极低频射电卫星在太阳风、空间等离子体和空间天气的研究上取得了较好的结果，如 STEREO/WAVES 得到了有关太阳 III 型射电暴[58]、II 型射电暴、极光千米级区域辐射的数据等[59]，还发现了木星十米级波长射电辐射的新周期[60]，为人类深入认识自身所处的环境提供了最直接的数据。空间卫星的联合观测是未来极低频射电发展的方向，利用已有的

搭载有极低频射电观测设备的卫星之间联合观测，与地面联合观测提高观测分辨率。

月基极低频得益于月球背面天然的无线电宁静的特点，极有可能使得人类在低频波段研究领域取得突破性进展。目前计划中的月基极低频射电探测方案都是采用着陆器与环绕器干涉的方式实现相关科学目标，这也将作为月基极低频探测前期尝试，为未来的月基极低频阵提供参考。如 The Radio Observatory on the Lunar Surface for Solar studies (ROLSS) 等将采用 Y 型布阵方式用于高灵敏度、高分辨率的观测，可以用来研究太阳射电的爆发机制和日珥喷发中的电子加速过程等[61]。嫦娥 4 号着陆器极低频射电频谱仪，荷兰-中国低频探测器，月球轨道超长波天文观测微卫星，都将是接下来一段时间内，极低频射电研究邻域重要的科学载荷，依赖于射电宁静的月球背面，将是打开天文学未深入开发的极低频域的第一步。

极低频射电天文观测结合位于地面、空间和月基等科学探测设备，在未来可逐步实现获得更低频率、更高灵敏度、更高分辨率的探测数据。这些数据可用于研究宇宙早期物理形态、行星米波级辐射、太阳射电暴等重要科学课题。

参考文献：

[1]Jansky K G. Directional Studies of Atmospherics at High Frequencies[M]. Berlin:Springer Netherlands, 1932:1920-1932.

[2]Shain C A, Komesaroff M M, Higgins C S. A high resolution galactic survey at 19.7 Mc/s[J]. Australian Journal of Physics, 1961, 14(4):508-514.

[3] Field G B. Excitation of the hydrogen 21-cm line[J]. Proceedings of the Ire, 1958, 46(1): 240-250.

[4] Kuhlen M, Madau P, Montgomery R. The spin temperature and 21cm brightness of the intergalactic medium in the pre-reionization era[J]. Astrophysical Journal, 2006, 637(1):170-179.

[5]Clardi B, Madau P. Probing beyond the epoch of hydrogen reionization with 21 centimeter radiation[J].Astrophysical Journal, 2003, 596(1): 1-8.

[6]Van Haarlem M P. LOFAR: the Low Frequency Array[J]. Eas Publications Series, 2005, 15(7):431-444.

[7]Huege T, Falcke H. Principles of Synchrotron Emission in an Astrophysical Context[C]//NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry.2004.

[8] Haddock F T. Radio astronomy observations from space[J]. ARS Journal, 2015, 30(7):598-602.

[9]Bastian T S. The Frequency Agile Solar Radiotelescope[M]// Solar and Space Weather Radiophysics. , 2004:47-69.

[10] Hamid Z S, Shariff N M, Ibrahim Z A, et al. Investigation of the statistical properties of solar radio burst type II and III[C]// International Conference on Space Science and Communication. 2015.

[11] 孔祥良，陈耀，冯士伟，等．具双频漂的 II 型射电暴断谱和相关太阳爆发过程的观测研究[C]// 全国日地空间物理学术研讨会．2011.

[12] Burke B F, Franklin K L. Observations of a variable radio source associated with the planet Jupiter[J]. Journal of Geophysical Research, 1955, 60(60):213-217.

[13] Imai M, Imai K, Higgins C A, et al. Comparison between Cassini and Voyager observations of Jupiter's decametric and hectometric radio emissions[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2011, 116(A12):A12233-A12244.

[14] Zabriskie F R. Low-frequency radio emission from Jupiter[J]. Astronomical Journal, 1970, 75(423):1045-1051.

[15]Grießmeier J M, Zarka P, Spreeuw H. Predicting low-frequency radio fluxes of known extrasolar planets[J]. Astronomy & Astrophysics, 2007, 475(1):1591-1603.

[16] Jansky K G. Electrical disturbances apparently of extraterrestrial origin[J]. Proceedings of the IEEE, 1933, 72(10):1387-1398.

[17]Orchiston W, Sullivan W T I. Book review: cosmic noise. a history of early radio astronomy (Sullivan)[J]. Journal of Astronomical History & Heritage, 2010，13（3）:256-257.

[18]Orchiston W, Slee B, George M, et al. The history of early low frequency radio astronomy in Australia. 4: Kerr, Shain, Higgins and the Hornsby Valley field station near Sydney[J]. Journal of Astronomical History & Heritage, 2015, 18(3): 285-311.

[19] George M, Orchiston W, Slee B, et al. The history of early low frequency radio astronomy in Australia. 2: Tasmania[J].Journal of Astronomical History & Heritage, 2015, 18(1): 14-22.

[20] He M, Liu L, Wan W, et al. A study on the nighttime midlatitude ionospheric trough[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2011, 116(A5):2-3.

[21] George M, Orchiston W, Wielebinski R, et al. The history of early low frequency radio astronomy in Australia. 5: Reber and the Kempton field station in Tasmania[J]. Journal of Astronomical History & Heritage,

2015, 18(3): 312-324.
[22] Cane H V, Whitham P S. Observations of the southern sky at five frequencies in the range 2-20 MHz[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1977, 179:21-29.
[23]Orchiston W, George M, Slee B, et al. The history of early low frequency radio astronomy in Australia. 1: the CSIRO Division of Radiophysics[J]. Journal of Astronomical History & Heritage, 2015, 18(1):3-13.
[24] George M, Orchiston W, Slee B, et al. The history of early low frequency radio astronomy in Australia. 3: Ellis, Reber and the Cambridge field station near Hobart[J].Journal of Astronomical History and Heritage, 1989,18(2): 177-189.
[25]Shain C A. The Sydney 19.7-MC radio telescope[J]. Proceedings of the IRE, 1958, 46(1): 85-88.
[26] Ellis G R A. The Llanherne low frequency radio telescope[J]. Publications of the Astronomical Society of Australia, 1972, 2(3): 135-137.
[27]Prestage N P, Luckhurst R G, Paterson B R, et al. A new radiospectrograph at Culgoora[J]. Solar Physics, 1994, 150(1):393-396.
[28]Erickson W C. The Bruny island radio spectrometer[J]. Publications of the Astronomical Society of Australia, 1997, 14(3):278-282.
[29]Ramesh R. Low frequency solar radio astronomy at the Indian Institute of Astrophysics (IIA)[C]// Astronomical Society of India Conference Series. 2011.
[30]Konovalenko A, Sodin L, Zakharenko V, et al. The modern radio astronomy network in Ukraine: UTR-2, URAN and GURT[J]. Experimental Astronomy, 2017, 42(1):1-38.
[31]Haarlem M P V. LOFAR: The Low Frequency Array[J]. Astronomy & Astrophysics, 2016, 556(7):629-635.
[32]Ellingson S W, Clarke T E, Cohen A S, et al. The Long Wavelength Array[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(8): 1421-1430.
[33]Lecacheux A, Rosolen C, Clerc V, et al. Digital techniques for ground-based low-frequency radio astronomy[C]//Proceedings of SPIE. 1998:533-542.
[34] Deutsch A J, Klemperer W B. Space age astronomy[C]// Space Age Astronomy. 1962.
[35]Benediktov E A, Getmantsev G G, Ginzburg V L. Radioastronomical investigations employing artificial satellites and space rockets[J]. Planetary & Space Science, 1962, 9(3):109-127.
[36]Hoang S. Rocket measurements of cosmic radio noise between 1.16 MHz and 2.40 MHz at 1600 km altitude [J]. Astronomy & Astrophysics, 1971, 15:383-402.
[37]Alexander J K, Kaiser M L, Novaco J C, et al. Scientific instrumentation of the Radio-Astronomy-Explorer-2 satellite[J]. Astronomy & Astrophysics, 1975, 129(3360):1415-1416.
[38] Bougeret J L, Kaiser M L, Kellogg P J, et al. WAVES: the radio and plasma wave investigation on the wind spacecraft[J]. Space Science Reviews, 1995, 71(1-4):231-263.
[39] Kaiser M L. The STEREO mission: an overview[J]. Advances in Space Research, 2005, 36(8):1483-1488.
[40]Warwick J W, Pearce J B, Peltzer R G, et al. Planetary radio astronomy experiment for Voyager missions[J]. Space Science Reviews, 1977, 21(3):309-327.
[41]Ogilvie K W, von Rosenvinge T, Durney A C. International sun-earth explorer: a three-spacecraft program[J]. Science, 1977, 198(4313):131-138.
[42]Gurnett D A, Anderson R R, Tsurutani B T, et al. Plasma wave turbulence at the magnetopause: observations from ISEE 1 and 2[J]. Advances in Space Research,1979, 84(A12):7043–7058.
[43]Gurnett D A, Kurth W S, Kirchner D L, et al. The Cassini radio and plasma wave investigation[J]. Space Science Reviews, 2004, 114(1):395-463.
[44]Inan U S, Bell T F, Carpenter D L, et al. Explorer 45 and Imp 6 observations in the magnetosphere of injected waves from the Siple Station VLF transmitter[J]. Journal of Geophysical Research,1977, 82(7):1177–1187.
[45]Reiner M J, Goetz K, Fainberg J, et al. Multipoint observations of solar type III radio bursts from STEREO and wind[J]. Solar Physics, 2009, 259(1):255-276.
[46] Jones D L, Allen R J, Basart J P, et al. The ALFA medium explorer mission[J]. Advances in Space Research, 2000, 26(4): 743-746.
[47]Gorgolewski S. Lunar Radio Astronomy Observatory[M]// Proceedings of the First Lunar International Laboratory (LIL) Symposium Research in Geosciences and Astronomy. Springer Vienna, 1966:78-84.
[48] Burns J O. A moon-earth radio interferometer[C]// Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century.1985:293-300.
[49] Douglas J N, Smith H J. A very low frequency radio astronomy observatory on the moon[C]// Lunar Bases and Space Activities in the 21st Century. 1988:301-306.
[50] Burns J O. A lunar far-side very low frequency array : proceedings of a workshop[C]// Workshop on a Lunar Far-Side Very Low Frequency Array. 1989:53 - 60.
[51]Drean R J, Caylor M A, Choi D U, et al. Engineering design of an unmanned lunar radio observatory[C]//ASP Conference Series.1992:347-358.
[52]何若愚，张洪波，苏彦，等. 月基低频天线技术研究[J]. 天文研究与技术，2017，14(1):17-24.

He Ruoyu, Zhang Hongbo, Su Yan, et al.Low Frequency Antenna on the Moon[J]. Astronomical Research andTechnology, 2017, 14(1):17-24.

[53]Mimoun D, Wieczorek M A, Alkalai L, et al. Farside explorer: unique science from a mission to the farside of the moon[J]. Experimental Astronomy, 2012: 529-585.

[54]叶明超. 新型平面偶极子天线研究[D]. 芜湖：安徽工程大学，2012

[55]艾国祥. 空间太阳望远镜[C]// 中国天文学会'97 天文望远镜及仪器新技术学术交流会. 1997.

[56]陈林杰，AMIN Aminaei，颜毅华. 月基甚低频射电干涉仪 Tripole 天线特性研究[J]. 电波科学学报，2010，25(6):1064-1072.

Chen Linjie, AMIN Aminaei, Yan Yihua. Characteristics analysis of tripole antenna for lunar very low frequency interferometer[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(6):1064-1072.

[57]张墨，黄茂海，颜毅华. 卫星定位精度对在轨甚低频干涉测量影响分析[J]. 天文研究与技术—国家天文台台刊，2014，11(4):362-368.

Zhang Mo, Huang Maohai, Yan Yihua.An analysis of influences of satellite positioning accuracies on Earth-orbital Ultra-Long Wavelength interferometry[J].Astronomical Research andTechnology—Publications of National Astronomical Observatories of China, 2014, 11(4):362-368.

[58] Eastwood J P, Wheatland M S, Hudson H S, et al. On the brightness and waiting-time distributions of a type III radio storm observed by STEREO/WAVES[J]. The Astrophysical Journal, 2009, 708(2):245-255.

[59]Gopalswamy N, Thompson W T, Davila J M, et al. Relation between type II bursts and CMEs inferred from STEREO observations[J]. Solar Physics, 2012, 277(2):459-459.

[60]Panchenko M, Rucker H O, Kaiser M L, et al. New periodicity in Jovian decametric radio emission[J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(5):L05106-1-L05106-5.

[61] Lazio T J W, Macdowall R J, Burns J O, et al. The radio observatory on the lunar surface for solar studies[J]. Advances in Space Research, 2011, 48(12):1942-1957.

The History and Development of The Low-Frequency Radio Observation

Mei Li[1,2,3], Su Yan[1,2,3], Zhou Jian-feng[4,5]

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing100012, China; 2. National Astronomical Observatory, Chinese Academy ofSciences, Beijing 100012, China; 3. Key Laboratory for Exploration in the Moon and Deep space, National Astronomical Observatory, Chinese Academy ofSciences, Beijing 100012, China; 4. Department of Engineering Physicsand Center for Astrophysics, Tsinghua University , Beijing 10084, China ; 5. Key Laboratory of Particle & Radiation Imaging (Tsinghua University) Ministry of Education ，Beijing 100084 ，China) ,

Abstract: The very low frequency radio wave() is an important radio frequency range of modern astronomical observation.The extremely low frequency detection can carry out important research about solar outburst, star formation, galaxy evolution and the early universeetc.But forsignal with frequency less than 10 ~ 20 MHZ, because of the Earth's ionosphere reflection or serious distortion effects, and on earth there are low frequency radio interference sources, it is unable to research on such band. The far-side of the moon is a unique platform for low-frequency radio observation, which is an ideal environment compare to the Earth.In this paper, we present an overview of the typical low frequency radio telescopes around the world since the birth of radio astronomy. We give a retrospective summary on the scientific significance and development status of low frequency radio astronomy, and introduce in detailabout the parametric and

technical points of these low frequency telescopes. We will introduce CE-4's low frequency radio spectrometer which will be the important instrument for low frequency radio observation in few years.

Key words: radio astronomy; low frequency radio; research situation; CE-4